干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

2000—2018年青海湖流域气温和降水量变化趋势空间分布特征

韩艳莉[1,2,3]， 于德永[4]， 陈克龙[2]， 杨海镇[3]

（1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京 100875；2. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810008；3. 青海民族大学生态环境与资源学院，青海 西宁 810007；4. 北京师范大学地理科学学部，北京 100875）

摘 要：青藏高原是全球气候变化的敏感区，气温和降水量的空间分布及变化趋势是气候变化研究的核心和基础，为开展生态环境变化评估提供基础资料。基于2000—2018年青海湖流域及其周边气象站观测数据，以高程为协变量，结合专业气象插值软件ANUSPLIN对气温和降水量进行空间插值。利用线性回归法分析了青海湖流域2000—2018年气温和降水量的变化趋势；利用双变量空间自相关分析法分析了青海湖流域气温和降水量空间匹配关系。结果表明：（1）2000—2018年青海湖流域年平均气温呈显著增加趋势，平均增速为0.30 ℃·$(10a)^{-1}$，春季增温显著。（2）降水量呈显著增加趋势，平均增速为73.20 mm·$(10a)^{-1}$，春夏季增速显著、秋季变化不明显、冬季趋于变干。（3）青海湖流域气温和降水量空间匹配差异显著。从年尺度来看，气温和降水量莫兰指数（Moran's *I*）为−0.66，表现为显著的负相关，面积比为67.56%，水热组合空间匹配不佳。从季节尺度来看，青海湖流域春季、夏季、秋季和冬季的气温和降水量Moran's *I*分别为−0.49、−0.80、−0.32和−0.14，均为空间负相关。春夏季，流域低海拔区域气温逐渐升高，高海拔区域降水量逐渐增多，气温和降水量空间负相关面积逐渐增大，水热组合空间匹配不佳。值得强调的是青海湖巨大水体对环湖区局地气温的调节作用明显，是青海湖流域的"气候调节器"。

关 键 词：气温；降水量；空间自相关；青海湖流域

文章编号：

气候变化不仅是当前突出的环境问题之一，也是未来人类可能面临的巨大风险[1]。气候变化威胁着人类的生存和发展，将成为全球面临的重大挑战。准确把握气候变化背景下，不同空间尺度气候变化的时空格局、区域差异，评估其对陆地生态系统的可能影响，预估未来气候变化风险，为国家制定应对气候变化宏观政策，促进社会可持续发展提供科学参考[1]。青藏高原是全球气候变化的"驱动机"和"放大器"[2]。近几十年来，青藏高原经历了明显的变暖[3-4]，由于高原面积广阔，内部地域分异显著，不同区域气温[4]和降水量[5]变化特征差异显著。目前，青藏高原气候变化相关研究[6-9]多侧重于高原整体或不同区域气温、降水量等气候要素的变化特征或趋势分析，对高原内部典型流域小尺度气候变化趋势及时空格局的相关研究相对较少。然而，青海湖流域作为青藏高原生物多样性保护和生态环境建设重点区域，近年来，吸引了众多学者的关注，也从不同的视角对青海湖流域气候变化进行了研究和探讨。如张明等[10]基于4个气象站观测数据分析了青海湖流域1987—2010年年平均气温和年平均降水量的变化趋势；曹生奎等[11]基于2个气象站观测数据分析了青海湖流域1961—2010

收稿日期：2021-10-22； **修订日期**：2022-12-02

基金项目：青海省生态环境价值评估及大生态产业发展综合研究（2019-SF-A12）；第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0405）；国家自然科学基金项目（41661023，41971269）；青海省国际合作项目（2019-HZ-802）资助

作者简介：韩艳莉（1984-），女，博士，主要从事生态环境保护与生态系统价值评估. E-mail: hanyanli0814@163.com

通讯作者：陈克龙（1965-），男，教授，主要从事生物地理和高寒湿地环境变化研究. E-mail: CKL7813@163.com

年年际和季节尺度气温与降水量的变化趋势；张令振等[12]基于4个气象站观测数据分析了青海湖流域1961—2018年气温和降水量的变化特征。目前的研究多侧重于气象站点上气候要素的时间变化特征和变化趋势分析，缺乏对青海湖流域气温和降水量等气候因子的空间分布格局分析[13]，对气温和降水量的空间匹配特征相关报道也较少[14]。因此，本文以青藏高原东北部青海湖流域为例，基于研究区及其周边20个气象站的地面观测数据，分析青海湖流域2000—2018年气温和降水量的时空分布格局及变化趋势，探索研究区气温与降水量的时空匹配特征，为开展气候及生态环境变化评估研究提供基础资料。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

青海湖是我国最大的内陆咸水湖，是我国西部重要的水源涵养地和水汽循环通道，是维系青藏高原生态安全的重要水体，是阻止西部荒漠化向东蔓延的天然屏障，被称为我国西北部的“气候调节器”和“空气加湿器”。青海湖流域是一个完整的封闭型高原内陆盆地，是青海湖及注入青海湖的布哈河、沙柳河、哈尔盖河、黑马河和其他河流的集水区。流域位于青藏高原的东北部（图1a），是中国西北干旱区、西南高寒区和东部季风区的交汇区，是全球气候变化的敏感地区和脆弱生态系统的典型地区[15]。流域深居内陆，海拔较高，为典型的高原大陆性气候，年平均气温介于-4.6~4.0 ℃，年平均降水量介于291.0~579.0 mm，且大部分集中在6—9月。流域近似梭形，介于36°15′~38°20′N、97°50′~101°22′E，海拔3036~5302 m（图1b），地势西北高东南低，地貌复杂，流域面积为29661 km^2。

1.2 数据来源

2000—2018年青海湖流域及其周边20个气象站月尺度气温和降水量数据来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn）；数字高程模型（Digital elevation model，DEM）来源于地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）ASTER GDEM V2（30 m）。所有数据统一采用阿尔伯斯等积圆锥投影（Krasovsky_1940_Albers），空间分辨率为250 m×250 m。

1.3 研究方法

1.3.1 气象数据插值 目前，气象数据插值多采用普通克里格（Ordinary kriging，OK）、反距离加权（Inverse distance weighted，IDW）和协同克里格（Cokriging，CK）等方法进行插值[16-17]。该方法多适用于站

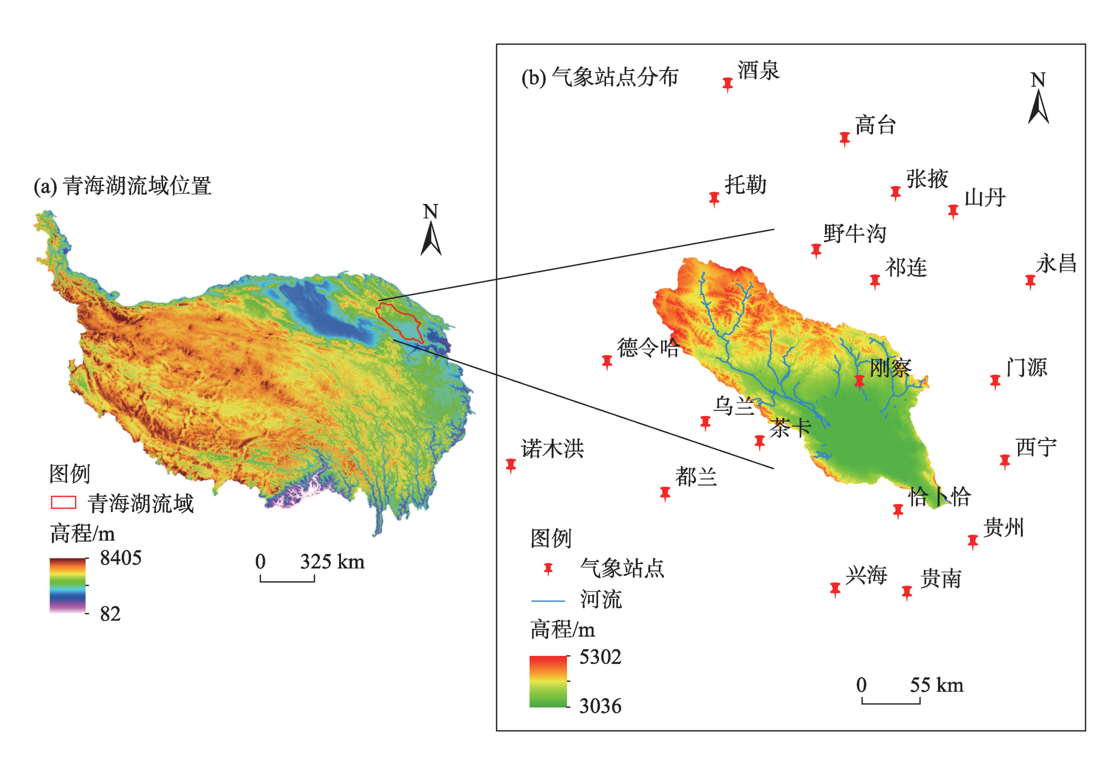


图1 青海湖流域位置及主要气象站点示意图

Fig. 1 Location of Qinghai Lake Basin and schematic diagram of main meteorological stations

点密度大、地势平坦的区域，对于站点稀少且地形复杂的区域，插值精度往往不理想[18-20]。以薄盘光滑样条函数为代表的区域精细化专业气象插值软件ANUSPLIN在国内外得到了广泛的应用[19-22]。从统计学角度来看，ANUSPLIN插值总体精度优于反距离加权和克里格插值法[23]。刘正佳等[19]在全国尺度以高程为协变量对降水量进行插值，结果表明ANUSPLIN插值精度较高，能准确地反映复杂地形条件下降水量的空间差异。谭剑波等[20]在青藏高原东南缘，利用ANUSPLIN和CK对气温进行插值，结果表明ANUSPLIN在山区气温模拟细节方面更加突出，且精度较高。

ANUSPLIN是基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论，对多变量数据进行空间内插的工具，它最早由Wahba提出，并由Bates等[24]将其扩展为局部薄盘光滑样条法。薄板样条是对样条函数法的曲面扩展，插值过程中利用最优光滑参数实现逼真度和光滑度最佳平衡，以保证精度且插值曲面光滑连续[20,25]，同时允许引入线性协变量子模型，最终构建了ANUSPLIN专业气象插值软件。局部薄盘光滑样条的理论统计模型为：

$$Z_i = f(x_i) + b^{\mathrm{T}} y_i + e_i, \quad i = 1, 2, \cdots, N \tag{1}$$

式中：Z_i为位于空间i处的因变量，是待插值点的气象要素值；x_i为独立变量，是位置i处周边已知控制点的气象要素值；$f(x_i)$为估算关于x_i的未知光滑函数；b为独立协变量(y_i)的系数；T为系数b的转置矩阵；y_i为独立协变量(高程)；e_i为随机误差。光滑函数f和系数b，利用控制点及周边已知控制点插值，通过最小二乘法确定。

1.3.2 趋势分析 利用一元线性回归对研究区气温和降水量进行时序变化趋势分析[26]。公式如下：

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times x_i) - \sum_{i=1}^{n} i \times \sum_{i=1}^{n}(x_i)}{n \times \left(\sum_{i=1}^{n} i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{2}$$

式中：x_i为栅格x第i年气象要素值(气温或降水量)；n为研究时间段的年数，本研究n取10；slope反映了气象要素值随时间的变化速率，当slope>0，气象要素值呈增大趋势，数值越大，增速越显著；当slope<0，气象要素值呈减小趋势，数值越小，降速越显著。

1.3.3 空间自相关分析 空间自相关是变量在不同空间位置上属性值聚集程度的一种度量[27]，分全局空间自相关和局部空间自相关两类。全局空间自相关用于检验变量在空间上是否存在聚集性，反映整个区域内各地域单元与邻近单元之间的相似性[28]；局部空间自相关(Local indicators of spatial association，LISA)用于描述空间单元周围局部区域相似程度的数值在空间上的聚集程度，能准确识别局部空间要素的聚集性和分异特征[29-30]，常采用局部莫兰指数(Moran's I)进行度量。本文采用双变量空间自相关分析青海湖流域气温和降水量空间匹配关系。双变量局部空间自相关[31]Moran's I指数计算公式如下：

$$I_{kl}^{i} = Z_k^i \sum_{j=1}^{n} w_{ij} Z_l^j \tag{3}$$

$$Z_k^i = \frac{x_k^i - \overline{x_k}}{\sigma_k} \tag{4}$$

$$Z_l^j = \frac{x_l^j - \overline{x_l}}{\sigma_l} \tag{5}$$

式中：I_{kl}^{i}为变量k与变量l在栅格i处的局部Moran's I指数；Z_k^i为对栅格i处变量k的标准差标准化；w_{ij}为栅格i和j的空间权重矩阵；Z_l^j为对栅格j处变量l的标准差标准化；x_k^i为变量k在栅格i处的属性值；$\overline{x_k}$为变量k的平均值；σ_k为变量k的方差；x_l^j为变量l在栅格j处的属性值；$\overline{x_l}$为变量l的平均值；σ_l为变量l的方差。

2 结果与分析

2.1 ANUSPLIN空间插值精度验证

为明确气象站的数量对气温和降水量空间插值精度的影响，分别用20个和12个气象站气温和降水量数据进行空间插值。并对气象站实际观测的气温和降水量数据(观测值)与ANUSPLIN软件插值获取的气温和降水量数据(模拟值)进行相关性分析，结合拟合优度R^2对插值结果进行可信度检验。结果显示基于20个气象站的年平均气温和年平均降水量的拟合优度R^2分别为0.9941和0.9229(图2a~b)；基于12个气象站的年平均气温和年平均降水量的拟合优度R^2分别为0.9913和0.9141。此外，将20个气象站中使用12个气象站剩余的8个气象站作为预留气象站，并利用预留气象站实际观测的气温和降水量数据(观测值)和基于12个气象站插值获取的气温和降水量数据(模拟值)进行相关分析。结果显示，ANUSPLIN软件对青海湖流域年

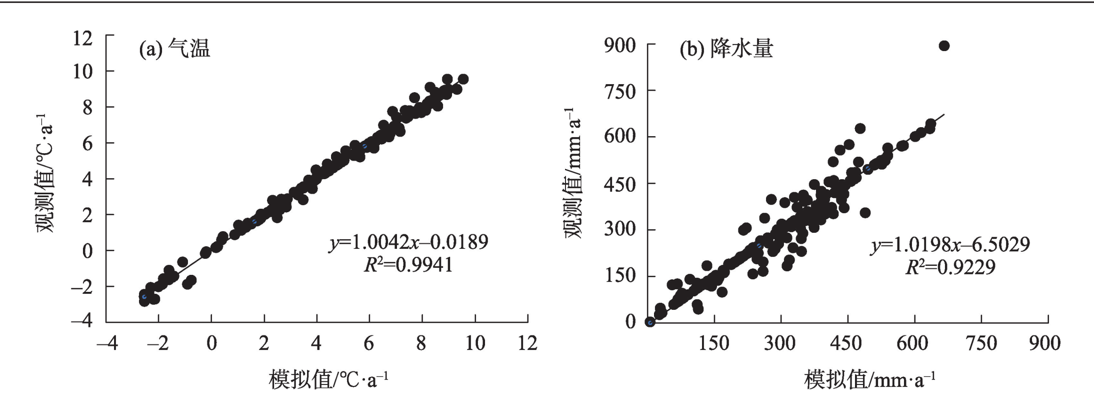


图2 青海湖流域气温和降水量观测值与模拟值散点图

Fig. 2 Scatter plot of observed and simulated values of temperature and precipitation in the Qinghai Lake Basin

平均气温拟合优度(R^2=0.8249),显著大于年平均降水量(R^2=0.5181)(图3a~b)。可见,以高程为协变量的ANUSPLIN软件对研究区气温和降水量的空间插值刻画较好,气温的模拟精度优于降水量,气象站的数量越多精度越高,模拟精度满足研究需求。因此,本文选取20个气象站进行空间插值。

2.2 青海湖流域气温空间分布特征及变化趋势

利用自然间断点分级法,在ArcGIS 10.4.1中绘制青海湖流域2000—2018年年均气温空间分布图(图4a)。青海湖流域2000—2018年年均气温为-2.04 ℃,与气象站统计结果基本一致[11];从空间分布来看,青海湖流域年平均气温由东南向西北随着海拔的升高而降低;从全年气温变化趋势来看(图4b),2000—2018年青海湖流域气温呈上升趋势。气温增速介于0.00~1.12 ℃·(10a)$^{-1}$,平均增速为0.30 ℃·(10a)$^{-1}$,与张明等[10]在青海湖流域1961—2018年增速0.40 ℃·(10a)$^{-1}$基本一致。整体来看,流域中部及北部增温显著,流域西北部及东南部增温不明显。

从季节尺度来看,2000—2018年青海湖流域春季、夏季、秋季和冬季平均气温分别为-1.19 ℃、8.69 ℃、-2.14 ℃和-13.44 ℃,与气象站统计结果基本一致[11]。从气温变化趋势来看,2000—2018年青海湖流域春季、夏季、秋季和冬季气温增速分别是-0.22~3.05 ℃·(10a)$^{-1}$(图4c)、-0.57~2.13 ℃·(10a)$^{-1}$(图4d)、-1.70~2.82 ℃·(10a)$^{-1}$(图4e)和0.00~4.51 ℃·(10a)$^{-1}$(图4f)。春季、夏季、秋季和冬季气温平均增速分别为0.60 ℃·(10a)$^{-1}$、0.50 ℃·(10a)$^{-1}$、0.04 ℃·(10a)$^{-1}$和0.30 ℃·(10a)$^{-1}$,均表现为增温。与张令振等[12]、刘凤等[6]和任国玉等[32]研究结果一致。从空间格局来看,春季增温幅度由西北向东南递减,流域北部增温趋势明显,流域东南部出现小幅度降温趋势(图4c);夏季全流域增温分布广泛,占总面积的99.41%。流域东北部增温趋势明显,流域东南部出现小幅度降温趋势(图4d);秋季增温趋势由东南向西北递减,流域东南增温趋势明显,流

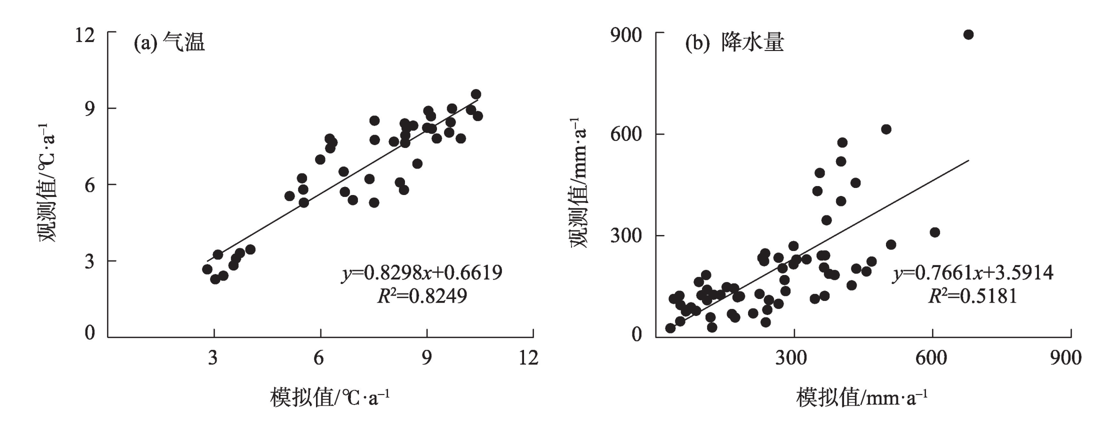


图3 青海湖流域预留站点气温和降水量观测值与模拟值散点图

Fig. 3 Scatter plot of observed and simulated values of temperature and precipitation at reserved stations in the Qinghai Lake Basin

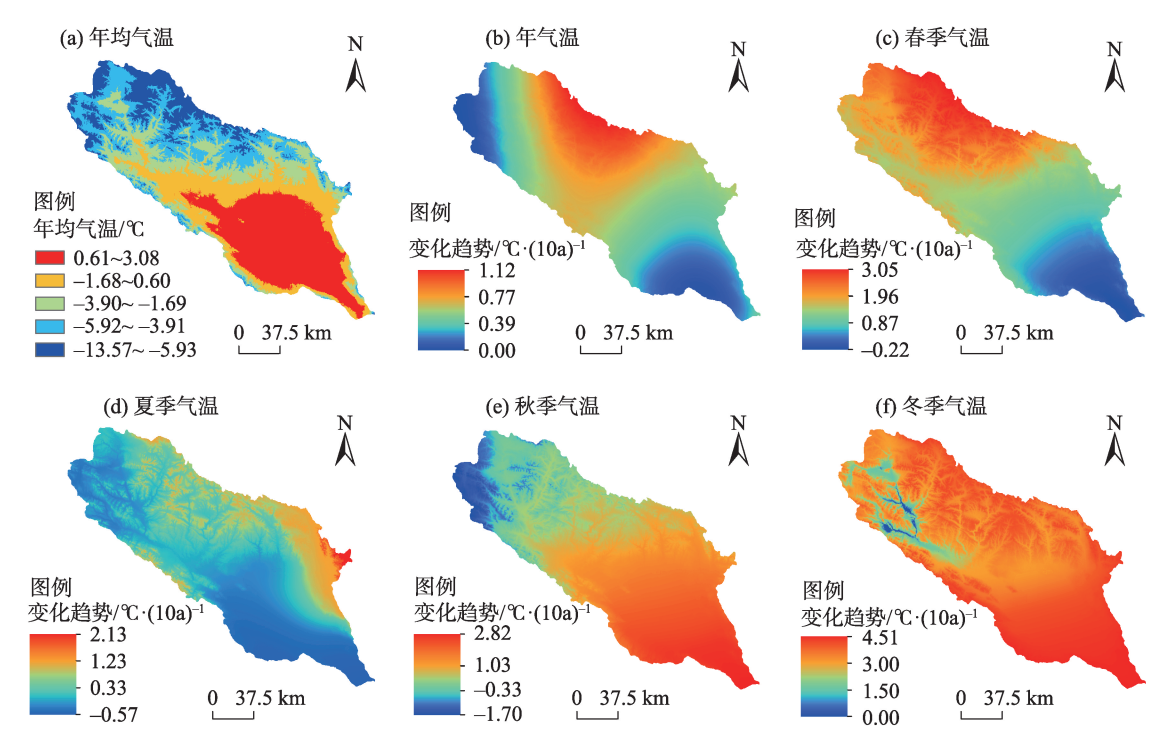


图4 青海湖流域气温空间分布及变化趋势

Fig. 4 Spatial distribution and change trend of temperature in the Qinghai Lake Basin

域西北部出现小幅度降温趋势(图4e);冬季全流域均为增温区域。流域东南部增温幅度较大,流域西北部河谷地区增速不明显(图4f)。

2.3 青海湖流域降水量空间分布特征及变化趋势

利用自然间断点分级法,在ArcGIS 10.4.1中绘制青海湖流域2000—2018年年均降水量空间分布图(图5a)。青海湖流域2000—2018年年均降水量为496.58 mm,与气象站统计数据基本一致[33];从空间分布格局来看,青海湖流域年均降水量由东南向西北随着海拔的升高而增加;从年降水量变化趋势来看(图5b),2000—2018年青海湖流域年降水量呈上升趋势,增速介于0.00~277.56 mm·(10a)$^{-1}$,平均增速73.20 mm·(10a)$^{-1}$。整体来看,流域东南部及南部降水量增速显著,流域西北部较稳定。

从季节尺度来看,青海湖流域2000—2018年春季、夏季、秋季和冬季平均降水量分别为78.72 mm、328.58 mm、83.11 mm和5.29 mm,与气象站统计结果基本一致[11]。从降水量季节变化趋势来看,春季、夏季、秋季和冬季分别为9.16~49.88 mm·(10a)$^{-1}$(图5c)、0.00~239.56 mm·(10a)$^{-1}$(图5d)、-5.68~21.61 mm·(10a)$^{-1}$(图5e)和-7.34~1.82 mm·(10a)$^{-1}$(图5f)。春季、夏季、秋季和冬季降水量平均增速分别为9.20 mm·(10a)$^{-1}$、64.20 mm·(10a)$^{-1}$、3.70 mm·(10a)$^{-1}$和-1.70 mm·(10a)$^{-1}$。从空间格局来看,春季青海湖南部降水量增速明显,流域东北部较稳定(图5c);夏季流域南部、北部高海拔地区降水量增速显著,青海湖北部及流域西北部较稳定(图5d);秋季降水量增速由东南向西北逐渐递减,青海湖湖区、湖区南部降水量呈增加趋势,流域西北部降水量呈减少趋势(图5e);冬季降水量在流域东北部、东部及南部边界表现为小幅度的增加趋势,流域西北部呈减少趋势(图5f)。

2.4 青海湖流域降水量和气温的空间匹配特征

使用GeoDa软件,引入双变量空间自相关分析法,借助ArcGIS可视化平台,定量分析青海湖流域降水量和气温的空间匹配特征。在z检验P>0.05的基础上绘制降水量与其邻域变量气温的双变量LISA图(图6)。

从年际尺度来看,青海湖流域降水量和气温全局Moran's I为-0.66,表明降水量与气温在空间上呈显著的负相关集聚特征,即降水量较多的区域气温相对较低,降水量较少的区域气温相对较高。从降水量与气温的LISA集聚图类型来看(图6a),降水量较多且邻域气温较高的高-高聚集型(高-高型)

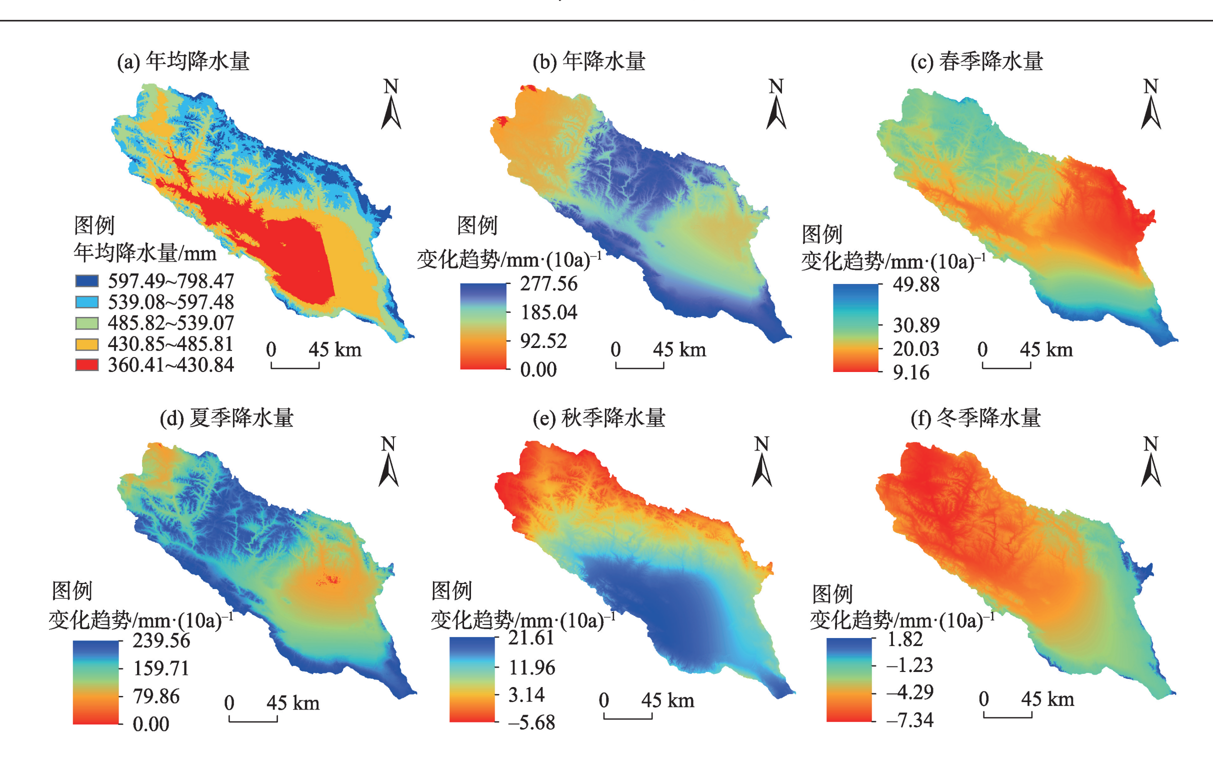


图5　青海湖流域降水量空间分布及变化趋势

Fig. 5　Spatial distribution and change trend of precipitation in the Qinghai Lake Basin

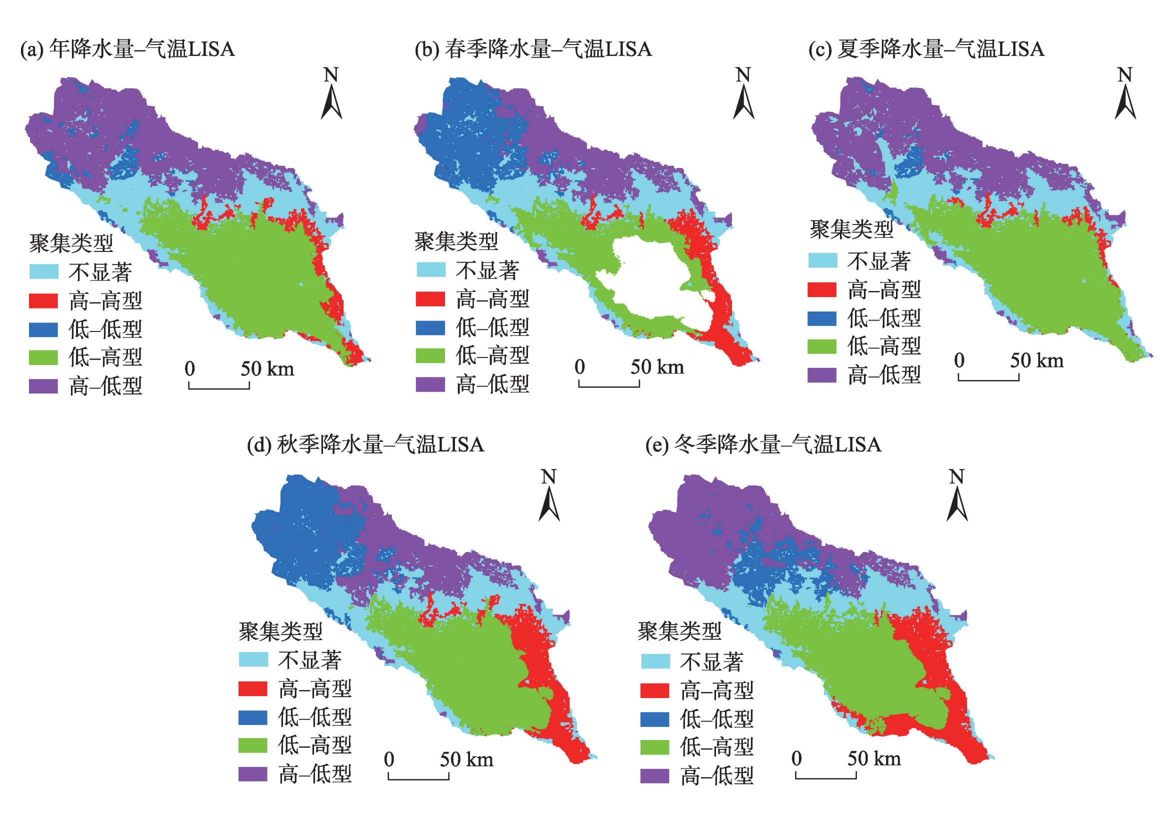


图6　青海湖流域降水量和气温LISA集聚图

Fig. 6　LISA aggregation map of precipitation and temperature in the Qinghai Lake Basin

主要分布在环湖区的北部、东北部和东南部，呈带状分布，面积比例为5.34%，为流域降水量气温组合“双高”区，适宜植被生长，生态环境优越；降水量较少且邻域气温较低的低–低聚集类型(低–低型)主要分布在流域西北部，呈散点状分布，面积比例为4.30%，为流域降水量气温组合“双低”区，不利于植

被生长，生态环境恶劣；降水量较少且邻域气温较高的低-高聚集类型（低-高型）主要分布在布哈河下游、青海湖及环湖区域，呈团块状分布，面积比例为35.71%，是流域海拔较低、气温较高、降水量相对较少的暖干区；降水量较多且邻域气温较低的高-低聚集类型（高-低型）主要分布在流域北部、西北部，呈团块分布，面积比例为31.85%，是流域海拔较高、气温较低、降水量相对较多的湿冷区。

从季节尺度来看，青海湖流域春季、夏季、秋季和冬季降水量和气温全局Moran's *I* 分别为-0.49、-0.80、-0.32和-0.14，表明降水量与气温在空间上均呈负相关集聚特征，夏季最强，春季次之，冬季最弱。从降水量与气温空间自相关整体特征来看（图6b~e），空间差异明显，分布格局相似。高-高型主要分布在环湖区，呈带状分布；低-低型主要分布在流域西北部，春秋季呈散点状分布，冬夏季呈团块状分布；低-高型主要分布在青海湖及环湖区域，呈团块状分布；高-低型主要分布在流域北部、西北部，呈片状分布。

从不同季节降水量和气温LISA集聚类型来看，春季青海湖环湖区东部及东南部降水量和气温呈高-高型，青海湖环湖区西部、南部及北部为低-高型，面积比例分别为8.24%和18.57%。流域北部、西北部分别是高-低型和低-低型，面积比例分别为18.17%和18.48%（图6b）；夏季流域北部、西北部降水量和气温呈高-低型，流域南部及东南部降水量和气温呈低-高型，面积比例分别为33.53%和38.55%（图6c）；秋季流域西北部降水量和气温呈低-低型，流域北部降水量和气温呈高-低型，面积比例分别为20.14%和17.75%。青海湖及环湖区降水量和气温呈低-高型，面积比例为30.12%（图6d）。冬季环湖区东北部降水量和气温呈高-高型面积比例为13.09%，为全年最大值（图6e）。总体来看，水热空间匹配不佳。

3 讨论

3.1 2000—2018年青海湖流域增温增湿趋势显著

从全年气温变化趋势来看，2000—2018年青海湖流域气温呈上升趋势，平均增速为0.30 ℃·(10a)$^{-1}$，与我国西北地区气温增速0.32 ℃·(10a)$^{-1}$(1961—2018年)[34]和青藏高原气温增速0.32 ℃·(10a)$^{-1}$(1961—2016年)[35]相当，高于全球0.11 ℃·(10a)$^{-1}$(1901—2018年)[36]、中国0.28 ℃·(10a)$^{-1}$(1960—2018年)[37]。研究表明，在全球气候变暖背景下，青海湖流域增温显著，对全球气候变化具有重要的指示作用。从气温季节变化趋势来看，四季均表现为增温趋势，春季增速最大，为0.60 ℃·(10a)$^{-1}$，与杨倩等[4]青藏高原中东部2000—2016年春季气温增速最大[0.64 ℃·(10a)$^{-1}$]结果一致。本文研究结果显示春季增温显著，不同于曹生奎等[11]冬季增温显著，原因在于本研究基于空间插值评估全流域栅格尺度气温的变化趋势，反映流域内气温整体变化特征。而曹生奎等[11]是基于气象站观测数据的统计分析，反映的是局地小气候变化特征。本研究气温的季节变化与全球、全国冬季增温显著稍有不同，但与青藏高原春季增温显著[4,38]相一致。从气温季节变化趋势的空间格局来看，春夏季流域北部和东北部气温增速高于青海湖东南部，与青藏高原夏季在祁连山地区形成"变暖中心"密切相关[39]。秋冬季流域东南部气温增速高于西北部，与青藏高原冬季"变暖中心"分布于高原中部[39]密切相关。春夏季流域北部气温增速高于南部，即春夏季流域北部对气候变暖响应的敏感程度高于南部。其原因可能与青海湖流域同时段降水量北多南少引起潜热的南北差异有关[39]。夏季由于青海湖流域受西风环流影响[34]，流域西北部、北部因祁连山、大通山等地形的抬升，海拔较高地区形成一个降水量高值区[40]，使得北部水分循环加快，潜热增大，最终出现气温增速的北高南低[39]。

从全年降水量的变化趋势来看，2000—2018年青海湖流域年降水量呈增加趋势，平均增速73.20 mm·(10a)$^{-1}$。与基于2001—2016年气象站统计的增速52.10 mm·(10a)$^{-1}$[41]、基于2000—2015年空间插值增速50~200 mm·(10a)$^{-1}$[6]的结果一致。高于2000—2019年祁连山增速46.30 mm·(10a)$^{-1}$[42]，高于1960—2018年青藏高原增速33.76 mm·(10a)$^{-1}$[37]。研究表明，在全球气候变暖背景下，流域气候增温增湿显著，再次证明青海湖流域气候趋于暖湿。青海湖流域降水量季节变化趋势表现为春夏季增多、秋季变化不明显、冬季趋于变干，变化趋势与全国一致[32]。夏季降水量增速最大，为64.20 mm·(10a)$^{-1}$，与张令振等[12]夏季增速显著相一致。春季经夏季到秋季，降水量增速明显的区域面积由流域西南向

东北逐渐扩大,夏季面积最大,秋季面积由东北向西南逐渐减小。张强等[34]研究结果显示,气候暖化趋势增强东扩,我国西北地区西部降水量更多受西风环流输送的水汽控制,且20世纪90年代末期以来西风环流持续增强,与青海湖流域气候暖湿变化特征吻合。表明青海湖流域降水量趋势增加与西风带的增强密切相关。

3.2 青海湖流域水热空间匹配不佳

青海湖流域降水量和气温空间组合差异显著,年降水量与年气温空间正相关面积比为9.63%,负相关面积比为67.56%。高-高型主要分布环湖东北部,面积仅为5.34%。高-低型主要分布于流域西北部,面积为31.85%。低-高型主要分布于流域的东南部,面积为35.71%。可见,流域东南部植被生长的限制性因子为降水量,西北部植被生长的限制性因子为气温,流域水热空间匹配不佳。

从季节尺度来看,春季,随着气温回暖,环湖区海拔较低、升温较快,东部及东南部为降水量和气温的高-高型集聚,西部及南部为低-高型集聚,表明青海湖北部及东部地区降水量和气温空间同步关联程度优于青海湖南部及西部地区;夏季,流域气温整体均较高,流域北部、西北部为降水量和气温高-低型集聚,流域南部及东南部为降水量和气温的低-高型集聚,面积比例分别为33.53%和38.55%。表明流域降水量和气温空间上呈匹配不佳。加之,高-高型集聚面积由春季的8.24%缩小至2.53%。可见,流域虽水热同期,但降水量和气温的负相关面积比例72.08%,水热空间匹配不佳;秋季气温逐渐下降,流域西北部的低-低型集聚面积由夏季的2.14%迅速扩大至20.14%,约9.41倍。流域西北部海拔较高,空气稀薄,大气的保温作用降低,气温迅速下降。流域北部高-低型集聚面积由夏季的33.53%快速缩小至17.75%,约1.89倍。青海湖区低-高型集聚,面积比例为30.12%。青海湖北部、东部及东南部为高-高型聚集由夏季的2.53%扩大至10.88%,约4.30倍。西北部高海拔地区降温较东南部迅速。可见,青海湖水体对局地气候调节作用显著。环湖区降水量和气温空间关联正相关匹配最佳。冬季气温降至最低,环湖区高-高型聚集面积比例扩大至13.09%,为全年最大值,表明青海湖湖水对局地气候"增温增湿"调节作用显著。研究表明,青海湖对流域内环湖区局地气温的调节作用明显,为青海湖流域的"气候调节器"。

从冬季到次年春季和夏季,青海湖流域降水量和气温空间负相关面积逐渐扩大。其本质是青海湖流域降水量由东南向西北随着海拔的升高逐渐递增,气温却是由东南向西北随着海拔的升高逐渐递减,且雨热同期。因此,出现冬季到次年春季和夏季流域水热空间不匹配逐渐增强的特征。

4 结论

(1) 以高程为协变量的ANUSPLIN软件对青海湖流域降水量和气温的空间插值刻画较好,气温插值精度显著大于降水量,拟合优度R^2均大于0.9,精度较高。

(2) 2000—2018年青海湖流域气温呈上升趋势,平均增速为0.30 ℃·(10a)$^{-1}$,增温显著。对全球气温变化具有重要的指示作用,流域中部及北部增温显著。春季、夏季、秋季和冬季气温增速分别为0.60 ℃·(10a)$^{-1}$、0.50 ℃·(10a)$^{-1}$、0.04 ℃·(10a)$^{-1}$和0.30 ℃·(10a)$^{-1}$。

(3) 2000—2018年青海湖流域降水量呈增加趋势,平均增速为73.20 mm·(10a)$^{-1}$。流域东南部及南部降水量增速显著。在变暖背景下,流域趋于暖湿。春季、夏季、秋季和冬季降水量增速分别为9.20 mm·(10a)$^{-1}$、64.20 mm·(10a)$^{-1}$、3.70 mm·(10a)$^{-1}$和-1.70 mm·(10a)$^{-1}$。春夏季增速显著、秋季变化不明显、冬季趋于变干。

(4) 利用双变量空间自相关,定量分析青海湖流域降水量和气温的空间匹配特征。从年尺度来看,降水量和气温全局Moran's I为-0.66,显著的负相关,面积比例为67.56%,水热空间匹配不佳。从季节尺度来看,青海湖流域春季、夏季、秋季和冬季的降水量和气温全局Moran's I分别为-0.49、-0.80、-0.32和-0.14,四季均为负相关,夏季最强,春季次之,冬季最弱。青海湖流域降水量和气温空间匹配不佳根本原因是青海湖流域降水量由东南向西北随着海拔的升高逐渐递增,气温却是由东南向西北随着海拔的升高逐渐递减,且雨热同期。

参考文献(References)

[1] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近30年气候变化趋势[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 3-11. [Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last

three decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 3-11.]

[2] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报, 1996, 32(1): 108-115. [Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change: Ⅲ. The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes [J]. Journal of Lanzhou University, 1996, 32(1): 108-115.]

[3] Yao T, Thompson L, Yang W. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

[4] 杨倩, 陈权亮, 陈朝平, 等. 全球变暖背景下青藏高原中东部地区温度变化特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(3): 352-358. [Yang Qian, Chen Quanliang, Chen Chaoping, et al. Spatial-temporal changes of temperature over the central and eastern part of Tibetan Plateau from 1960 to 2016[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, 35(3): 352-358.]

[5] 马伟东, 刘峰贵, 周强, 等. 1961—2017年青藏高原极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(12): 3039-3050. [Ma Weidong, Liu Fenggui, Zhou Qiang, et al. Characteristics of extreme precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(12): 3039-3050.]

[6] 刘凤, 曾永年. 近16年青海高原植被NPP时空格局变化及气候与人为因素的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1528-1540. [Liu Feng, Zeng Yongnian. Spatial-temporal change in vegetation net primary productivity and its response to climate and human activities in Qinghai Plateau in the past 16 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1528-1540.]

[7] 次央, 次仁旺姆, 德吉, 等. 1961—2015年青藏高原极端气温事件的气候变化特征[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(2): 108-114. [Ci Yang, Ciren Wangmu, De Ji, et al. Climate change characteristics of extreme temperature events in the Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2015[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2021, 41(2): 108-114.]

[8] 王慧, 张璐, 石兴东, 等. 2000年后青藏高原区域气候的一些新变化[J]. 地球科学进展, 2021, 36(8): 785-796. [Wang Hui, Zhang Lu, Shi Xingdong, et al. Some new changes of the regional climate on the Tibetan Plateau since 2000[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(8): 785-796.]

[9] 吴国栋, 薛河儒, 刘廷玺. 1961—2016年锡林河流域降水及平均气温变化特征及趋势[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 769-777. [Wu Guodong, Xue Heru, Liu Tingxi. Change characteristics and trends of precipitation and average temperature in the Xilinhe River Basin from 1961 to 2016[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 769-777.]

[10] 张明, 曹学章. 青海湖流域近50年气候变化与特征分析[J]. 新疆环境保护, 2016, 38(4): 6-11. [Zhang Ming, Cao Xuezhang. Analysis of climate change and its characteristics in Qinghai Lake Basin over the past 50 years[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2016, 38(4): 6-11.]

[11] 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 等. 青海湖流域近50年气温、降水变化特征研究[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2013, 29(2): 37-41, 47. [Cao Shengkui, Cao Guangchao, Chen Kelong, et al. Research in the variation characteristics of temperature and precipitation for lately 50 years in the Qinghai Lake Basin[J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition), 2013, 29 (2): 37-41, 47.]

[12] 张令振, 文霞, 祁小娟. 青海湖流域气候变化特征及其影响[J]. 青海科技, 2019, 26(3): 84-91. [Zhang Lingzhen, Wen Xia, Qi Xiaojuan. Characteristics and impacts of climate change in Qinghai Lake Basin[J]. Qinghai Science and Technology, 2019, 26(3): 84-91.]

[13] 赵建婷, 王艳君, 苏布达, 等. 印度河流域气温、降水、蒸发及干旱变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 349-359. [Zhao Jianting, Wang Yanjun, Su Buda, et al. Spatiotemporal distributions of temperature, precipitation, evapotranspiration, and drought in the Indus River Basin[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 349-359.]

[14] 孔锋, 孙劭. 基于均值与极值的中国夏季气温与地温的时空格局与差异特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 84-91. [Kong Feng, Sun Shao. Spatiotemporal pattern and difference characteristics of summer atmospheric temperature and ground temperature in China based on mean and extreme values[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(7): 84-91.]

[15] 李惠梅, 张安录, 高泽兵, 等. 青海湖地区生态系统服务价值变化分析[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1747-1754. [Li Huimei, Zhang Anlu, Gao Zebing, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate and socio-economic driving factors of land use change on the ecosystem services value in the Qinghai Lake area [J]. Progress in Geography, 2012, 31(12): 1747-1754.]

[16] 李春娥. 新疆土地荒漠化时空变化特征分析[J]. 测绘科学, 2018, 43(9): 33-39. [Li Chun'e. Spatial-temporal variation of land desertification in Xinjiang[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(9): 33-39.]

[17] 陈忠升, 高翊富, 赵仕梅. 1960—2017年成渝经济区气候变化时空特征分析[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2019, 40 (3): 85-92. [Chen Zhongsheng, Gao Yufu, Zhao Shimei. On the spatial-temporal characteristics of climate change in Cheng-Yu Economic Zone during 1960—2017[J]. Journal of China West Normal University (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 85-92.]

[18] 李月臣, 何志明, 刘春霞. 基于站点观测数据的气温空间化方法评述[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1019-1028. [Li Yuechen, He Zhiming, Liu Chunxia. Review on spatial interpolation methods of temperature data from meteorological stations[J]. Progress in Geography, 2014, 33(8): 1019-1028.]

[19] 刘正佳, 于兴修, 王丝丝, 等. 薄盘光滑样条插值中三种协变量方法的降水量插值精度比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 56-62. [Liu Zhengjia, Yu Xingxiu, Wang Sisi, et al. Comparative analysis of three covariates methods in Thin-Plate Smoothing Splines for interpolating precipitation[J]. Progress in Geography,

2012, 31(1): 56-62.]

[20] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素Anusplin和Cokriging空间插值对比分析[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 875-886. [Tan Jianbo, Li Ainong, Lei Guangbin. Contrast on Anusplin and Cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(4): 875-886.]

[21] Hijmans R J, Ca Meron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2010, 25(15): 1965-1978.

[22] Hutchinson M F. The application of Thin Plate Smoothing Splines to continent wide data assimilation. Data assimilation systems, BM-RC research report[R]. Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991: 104-113.

[23] 钱永兰, 吕厚荃, 张艳红. 基于ANUSPLIN软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(2): 7-15. [Qian Yonglan, Lü Houquan, Zhang Yanhong. Application and assessment of spatial interpolation method on daily meteorological elements based on ANUSPLIN software[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(2): 7-15.]

[24] Bates D M, Lindstrom M J, Wahba G, et al. GVCPACK-routines for generalized cross validation[J]. Communication in Statistics-Simulation and Computation, 1987, 16(1): 263-297.

[25] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1995, 9(4): 385-403.

[26] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近50年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34. [Xu Zongxue, Zhang Nan. Long-term trend of precipitation in the Yellow River Basin during the past 50 years [J]. Geographical Research, 2006, 25(1): 27-34.]

[27] 江颖慧, 焦利民, 张博恩. 城市地表温度与NDVI空间相关性的尺度效应[J]. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1362-1370. [Jiang Yinghui, Jiao Limin, Zhang Bo'en. Scale effect of the spatial correlation between urban land surface temperature and NDVI[J]. Progress in Geography, 2018, 37(10): 1362-1370.]

[28] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2366-2377. [Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Wu Tingtian, et al. Spatial autocorrelation pattern analysis of land use and the value of ecosystem services in northeast Hainan Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2366-2377.]

[29] 连健, 李小娟, 宫辉力, 等. 基于ESDA的北京市乡镇农业经济空间特性分析[J]. 地域研究与开发, 2010, 29(1): 130-135. [Lian Jian, Li Xiaojuan, Gong Huili, et al. Analysis of agricultural economy spatial characteristics of Beijing townships based on ESDA[J]. Areal Research and Development, 2010, 29(1): 130-135.]

[30] 侯进宇. 基于空间自相关的村域经济研究——以河南省巩义市为例[D]. 开封: 河南大学, 2012. [Hou Jinyu. Research on village economy based on spatial autocorrelation: A case study of Gongyi City, Henan Province[D]. Kaifeng: Henan University, 2012.]

[31] Anselin L, Syabri I, Kho Y. GeoDa: An introduction to spatial data analysis[J]. Geographical Analysis, 2005, 38(1): 5-22.

[32] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. [Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942-956.]

[33] 裴生山, 张顺桂, 张思芳, 等. 青海湖流域降水量变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 217-219, 224. [Pei Shengshan, Zhang Shungui, Zhang Sifang, et al. Analysis of change trend of precipitation in Qinghai Lake Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(4): 217-219, 224.]

[34] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(28): 3757-3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66 (28): 3757-3771.]

[35] 赵金鹏. 1961—2016年青藏高原极端气候事件变化特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Zhao Jinpeng. Study on the variation characteristics of extreme climate events on the Qinghai-Tibetan Plateau during 1961—2016[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]

[36] 张寅, 闫凯, 刘钊, 等. 基于CRU数据的1901—2018年全球陆表气温时空变化特征分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 51-58. [Zhang Yan, Yan Kai, Liu Zhao, et al. Analysis of spatio-temporal variation characteristics of global surface air temperature from 1901 to 2018 based on CRU data[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Sciences Edition), 2020, 41 (6): 51-58.]

[37] 赵东升, 高璇, 吴绍洪, 等. 基于自然分区的1960—2018年中国气候变化特征[J]. 地球科学进展, 2020, 35(7): 750-760. [Zhao Dongsheng, Gao Xuan, Wu Shaohong, et al. Trend of climate variation in China from 1960 to 2018 based on natural regionalization [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(7): 750-760.]

[38] 吴成启, 唐登勇. 近50年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 262-266, 272. [Wu Chengqi, Tang Dengyong. Change of temperature in the Tibetan Plateau in the context of global warming in recent 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 262-266, 272.]

[39] 魏莹, 段克勤. 1980—2016年青藏高原变暖时空特征及其可能影响原因[J]. 高原气象, 2020, 39(3): 459-466. [Wei Ying, Duan Keqin. Temporal and spatial characteristics and possible causes research of Qinghai-Tibetan Plateau warming from 1980 to 2016 [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3): 459-466.]

[40] 刘小园. 青海湖流域水文特征[J]. 水文, 2004, 24(2): 60-61. [Liu Xiaoyuan. The hydrological characteristics of the basin of Lake Qinghai[J]. Journal of China Hydrology, 2004, 24(2): 60-61.]

[41] 方健梅, 马国青, 余新晓, 等. 青海湖流域NDVI时空变化特征及其与气候之间的关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 105-112. [Fang Jianmei, Ma Guoqing, Yu Xinxiao, et al. Spatiotempo-

ral variation of NDVI in Qinghai Lake Basin and its relationship with climatic factors[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 105-112.]

[42] 肖莲桂, 石明章, 喇玉先, 等. 1961—2019年祁连山地区降水变化特征分析[J]. 青海科技, 2020, 27(5): 76-80. [Xiao Liangui, Shi Mingzhang, La Yuxian, et al. Analysis on the characteristics of precipitation changes in Qilian Mountains from 1961 to 2019[J]. Qinghai Science and Technology, 2020, 27(5): 76-80.]

Spatial distribution characteristics of temperature and precipitation trend in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2018

HAN Yanli[1,2,3], YU Deyong[4], CHEN Kelong[2], YANG Haizhen[3]

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 3. College of Ecological Environment and Resources, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, Qinghai, China; 4. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau, China is a sensitive area for global climate change. The spatial distribution and change trend of temperature and precipitation are the core and foundation of climate change research and provide basic data for developing ecological environment change assessment. This paper is based on the observation data of meteorological stations in the Qinghai Lake Basin and its surroundings during 2000—2018 using elevation as a covariate combined with the professional meteorological interpolation software ANUSPLIN to perform spatial interpolation of temperature and precipitation. The linear regression method was used to analyze the variation in the temperature and precipitation in the Qinghai Lake Basin. Furthermore, bivariate spatial autocorrelation analysis was used to analyze the spatial coupling relationship of temperature and precipitation in the basin. The research results show the following: (1) The temperature in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2018 showed an increasing, with an average growth rate of 0.30 ℃·$(10a)^{-1}$, and increased significantly in spring. (2) Precipitation showed a significant increasing trend, with an average growth rate of 73.20 mm·$(10a)^{-1}$; the growth rate is significant in spring and summer, the change is not obvious in autumn, and the winter tends to become dry. (3) The spatial matching of temperature and precipitation in the Qinghai Lake Basin is significantly different. On the interannual scale, the Moran's *I* of temperature and precipitation is −0.66, showing a significantly negative correlation, with an area ratio of 67.56% and poor spatial matching of water and heat combinations. On a seasonal scale, the Moran's *I* of temperature and precipitation in the Qinghai Lake Basin in spring, summer, autumn, and winter are −0.49, −0.80, −0.32, and −0.14, respectively, which are all negatively correlated in space. In spring and summer, the temperature in the low-altitude areas of the basin gradually increases, the precipitation in the high-altitude areas gradually increases, the area of negative correlation between temperature and precipitation gradually increases, and the spatial matching of water and heat is poor. Notably, the large water body of Qinghai Lake has an obvious regulating effect on the local temperature in the area surrounding the lake and serves as the climate regulator of the Qinghai Lake Basin.

Key words: temperature; precipitation; spatial autocorrelation analysis; Qinghai Lake Basin